

УДК 681.5

ИМИТАЦИОННАЯ ЭВРИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МАГИСТРАЛЬНОГО НЕФТЕПРОВОДА

Е.Д. Агафонов, Г.В. Ващенко

Статья посвящена обсуждению имитационных моделей процессов, протекающих в магистральном нефтепроводе. Предложен эвристический подход к созданию модели участка трубопровода, и реализующий его алгоритм. Модель имеет дискретную природу и построена на основе физических закономерностей гидродинамики. Приведены иллюстрации работы алгоритма, даны рекомендации к его настройке.

Ключевые слова: магистральный нефтепровод, гидродинамика, имитационная модель

Введение

В теории и практике анализа данных существует обширный класс задач прогноза технологических параметров сложных технических объектов с целью управления, обеспечения безаварийной работы, оптимизации технологических режимов и экономии ресурсов. Инструментарий, применяемый для решения задачи прогноза, будет зависеть от типа рассматриваемого объекта, его фундаментальных свойств и доступной информации об объекте.

Любая задача анализа данных, в том числе и задача прогноза технологических параметров, сводится к построению модели объекта. Методология построения математических моделей объектов различной природы входит в предмет теории идентификации [2], [8]. Выбор того или иного метода идентификации зависит от уровня априорной информации об исследуемом объекте, и чем больше неопределенность, тем сложнее с ним работать.

Наряду с методами теории идентификации существует технология имитационного моделирования [3], которая также предлагает один из способов преодоления неопределенности в процессе построения модели объекта. При имитационном моделировании реализующий модель алгоритм воспроизводит процесс функционирования системы во времени. Имитируются элементарные явления, составляющие процесс, с сохранением их логической структуры и последовательности протекания во времени [7]. Имитационные модели применяются при отсутствии аналитических моделей объекта, либо в случае, когда не разработаны методы решения полученной модели.

Магистральный нефтепровод – сложное техническое сооружение, эксплуатация которого на сегодняшний день невозможна без решения задач контроля, диагностики и управления. Перечисленные задачи нераз-

рывно связаны с измерением параметров технологического процесса, их обработкой и принятием решений о режимах работы технологического оборудования нефтепровода. На всех этапах эксплуатации оборудования магистрального нефтепровода требуется привлечение математических моделей. В частности, существует необходимость создания моделей магистральных трубопроводов с целью прогноза развития гидравлических процессов, расхода электроэнергии при эксплуатации насосов, управления процессом перекачки в целом, а также обеспечения безопасности функционирования оборудования магистрального нефтепровода.

В зависимости от своего назначения выделяют следующие типы моделей:

- модели статических процессов в трубопроводе (используются для расчета установившихся режимов магистрального нефтепровода);
- модели неуставившихся процессов (необходимы для описания переходов между технологическими режимами).

В качестве основного подхода к построению моделей технологических режимов перекачки нефти в АО «Транснефть – Западная Сибирь» в настоящее время принимается процедура создания статических моделей течения нефти. Модель представляет собой большую систему нелинейных алгебраических уравнений, сформированную в соответствии с законами Кирхгофа для трубопроводной сети [5]. Уравнения описывают установившиеся процессы, происходящие в узлах и независимых контурах сети. Для численного решения системы уравнений применяется модифицированный метод последовательных приближений [6].

Практика эксплуатации магистрального нефтепровода показывает, что среднее время, в течение которого происходит переход от одного стационарного технологического режима к другому, нередко превышает время работы в рамках какого-либо из стационарных режимов. Вследствие этого для эффективного управления процессами, планирования расхода энергоресурсов возникает необходимость в построении нестационарных гидродинамических моделей, описывающих переходные процессы в магистральном трубопроводе.

Привлечение технологии имитационного моделирования процессов в магистральном нефтепроводе обусловлено кроме других причин еще и тем фактом, что зачастую предприятия, эксплуатирующие нефтепровод, не обладают целостными и объективными данными измерения параметров технологического процесса. Сбор данных о технологических параметрах производится с разными целями разными подразделениями (службами) компании - эксплуатанта магистрального нефтепровода. Наибольшее значение предается данным, имеющим решающее значение в выполнении целевых показателей, таких как объемы перекачки нефти, расход энергоресурсов. Также осуществляется мониторинг параметров, влияющих на безопасность эксплуатации оборудования.

Вследствие сказанного наблюдается рассогласованность и физическая раздробленность данных измерений, в них присутствуют многочисленные пропуски. Негативную роль играет тот факт, что одновременно эксплуатируется измерительное оборудование и системы различных поколений, разных производителей и так далее.

Хорошо известен и развит подход к моделированию гидродинамических процессов в магистральном нефтепроводе с использованием дифференциальных уравнений в частных производных, в том числе уравнений Навье-Стокса [1]. При этом существует проблема аналитической неразрешимости таких уравнений, при их построении делается множество допущений, таких как слабая сжимаемость жидкости, неизменная вязкость, ньютоновский характер описания жидкости и т. д. На практике классические модели гидродинамики требуют настройки, в том числе с привлечением экспертов, а также применения численных методов для их построения, т. е. обладают всеми признаками имитационных моделей.

Настоящая работа направлена на построение эвристической имитационной модели гидродинамических процессов в магистральном нефтепроводе в ситуации недостатка и рассогласованности измерений технологических параметров. Она содержит описание одного подхода к синтезу эвристической модели неустановившихся процессов в трубопроводе.

1. Принцип построения модели

Предложим эвристический подход к построению гидродинамических моделей для описания неустановившихся процессов в магистральном нефтепроводе. За основу примем следующее предположение. Пусть участок трубопровода разделен на конечное количество равных сегментов (рис. 1).

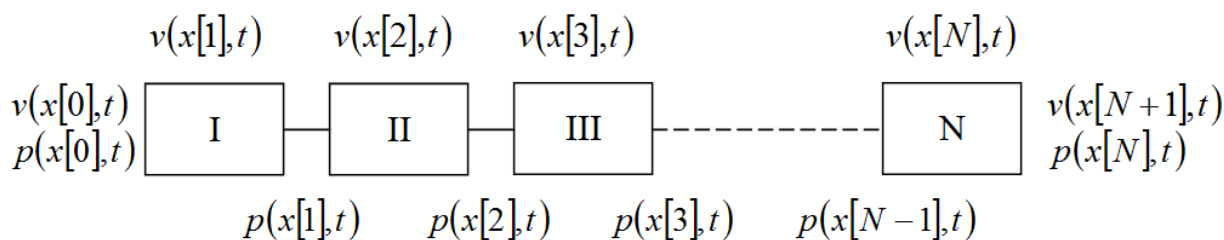


Рис. 1. Схема разбиения участка трубопровода на сегменты

Каждый из участков характеризуется определенным набором свойств протекающей по нему нефти, включая физические ее параметры: плотность, вязкость, температуру, скорость потока, внутренний диаметр трубопровода и т. д. На левой и правой границах каждого сегмента заданы определенные значения давления p .

Задаем временную сетку с шагом Δt , связанным со значением длины сегментов трубопровода Δx через скорость распространения волн давления. В качестве модели течения жидкости в сегменте трубопровода на протяжении временного шага принимаем модель установившегося течения в виде уравнения Бернулли [1]:

$$\frac{p_{вх} - p_{вых}}{\rho g} + (z_{вх} - z_{вых}) = \frac{\lambda(Re, \varepsilon) \Delta x v^2}{2dg},$$

где $p_{вх}$, $p_{вых}$ – давления во входном и выходном сечениях сегмента трубопровода; $z_{вх}$, $z_{вых}$ – геометрические высоты указанных сечений; d – внутренний диаметр трубопровода; g – ускорение силы тяжести, ρ – плотность, v – скорость потока жидкости в трубопроводе. Коэффициент гидравлического сопротивления $\lambda(Re, \varepsilon)$ может быть рассчитан в соответствии методикой, принятой в гидродинамике [1], [4]. Левая часть уравнения представляет собой суммарную разницу напоров на концах сегмента трубопровода, в правой части потеря напора за счет действия сил трения жидкости о стенки трубопровода.

Из уравнения Бернулли выражаем силу трения, действующую на поток жидкости в трубопроводе для дискретного значения времени $[t]$:

$$F_{тр}[t] = \frac{\lambda(Re, \varepsilon) \Delta x S v[t] v[t] \rho[t]}{2d}, \quad (1)$$

где плотность жидкости находится, например, из соотношения

$$\rho[t] = \rho_0 + \beta \rho_0 (p_{вх}[t]/2 + p_{вых}[t]/2 - p_0),$$

где β – коэффициент сжимаемости жидкости [1/Па], ρ_0 – плотность жидкости при нормальных условиях. Таким образом, принимается линейный закон изменения плотности в зависимости от среднего давления жидкости в сегменте модели.

Жидкость в рассматриваемом сегменте, в свою очередь, приводится в движение силой напора, вызванной разницей давлений на краях сегмента:

$$F_{нап}[t] = (p_{вх}[t] - p_{вых}[t])S + (z_{вх} - z_{вых})g\rho[t]S.$$

Жидкость в момент времени $[t]$ подвергается действию суммарной силы $F_{нап}[t] - F_{тр}[t]$. Это приводит к движению жидкости с ускорением:

$$a[t+1] = (F_{nan}[t] - F_{mp}[t]) / \rho[t] \Delta x S. \quad (2)$$

С учетом (2) можно пересчитать скорость потока для следующего момента времени $[t+1]$:

$$v[t+1] = v[t] + \Delta t (F_{nan} - F_{mp}) / \rho[t] \Delta x S.$$

Скоростной напор жидкости приводит к изменению давлений в границах между соседними сегментами:

$$p[t+1] = p[t] + \rho_{ex}[t] v_{ex}[t+1] v_{ex}[t+1] - \rho_{вх}[t] v_{вх}[t+1] v_{вх}[t+1] \quad (3)$$

Давления (3) пересчитываются для всех граничных точек и служат исходными данными для дальнейшего расчета в соответствии с формулой (1) и далее. Таким образом, получаем циклический алгоритм, позволяющий прогнозировать протекание процессов в участке трубопровода с течением времени.

2. Численные эксперименты с алгоритмом построения эвристической модели

Описанный алгоритм был реализован в виде программы в системе MATLAB 2012. Исходные данные при построении моделей включают значения следующих параметров:

- плотность жидкости $\rho_0 = 820 \text{ кг/м}^3$;
- длина участка трубопровода $L = 2000 \text{ м}$;
- длина расчетного сегмента $\Delta x = 125 \text{ м}$;
- внутренний диаметр трубопровода $d = 0,72 \text{ м}$;
- относительная шероховатость внутренних стенок трубопровода $\varepsilon = 2,78 \cdot 10^{-4}$;
- скорость распространения волн давления $c = 1000 \text{ м/с}$;
- ускорение силы тяжести $g = 9,81 \text{ м/с}^2$;
- характеристика профиля трубопровода - горизонтальный по всей длине участка;
- базовое давление в трубопроводе $p_0 = 101325 \text{ Па}$ для экспериментов I и II, $p_0 = 506625 \text{ Па}$ для эксперимента III.

Первый эксперимент представляет собой отображение реакции системы на ступенчатое воздействие по давлению в левом граничном сечении. Начальные условия выбраны следующим образом:

$$v(x,0)=0, p(x,0)=p_0.$$

В правом граничном сечении располагается заглушка, что соответствует следующему граничному условию:

$$v(L,t)=0$$

Граничное условие в левом сечении, в соответствии с условием эксперимента:

$$p(0,t)=0, t>0.$$

Расчетные значения давления в зависимости от времени и координаты сечения трубопровода для численного эксперимента I представлены на рис. 2.

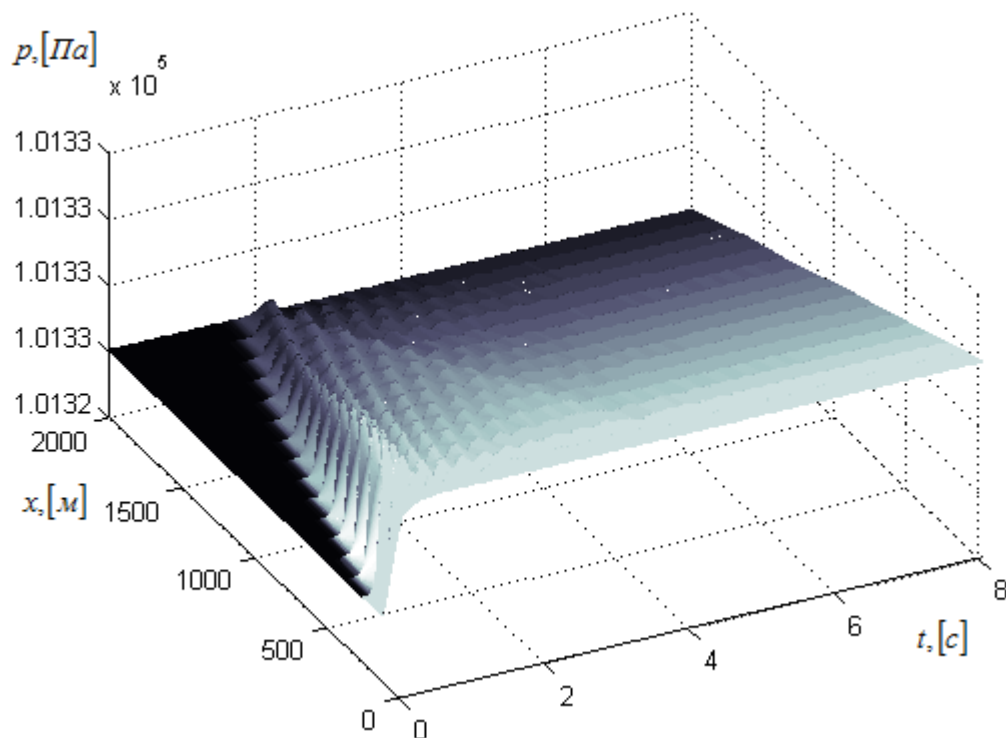


Рис. 2. Расчетные значения давления в зависимости от времени и координаты сечения трубопровода для численного эксперимента I

Основные характеристики полученной модели, которые требуют настройки:

- степень затухания;
- скорость распространения волн.

Степень затухания волн давления в модели может значительно отличаться от фактической. Следовательно, для решения практических задач требуется настройка коэффициентов гидравлического сопротивления. Скорость затухания должна настраиваться по данным измерений линейных датчиков давления магистрального нефтепровода.

Осцилляции в эвристической модели обусловлены способом ее формирования из моделей конечных сегментов, в которых кинетическая энергия движущейся жидкости переходит в потенциальную энергию разности давлений и наоборот. В данном случае, осциллирующий характер согласуется с данными наблюдений процессов в трубопроводе. Период осцилляций связан с шагом разбиения участка трубопровода на сегменты, следовательно, выбор величин и будет основан на параметрах волновых характеристик распространения возмущений в трубопроводе.

Скорость распространения волн давления в представленной эвристической модели не является постоянной. В этом смысле, можно предполагать, что модель учитывает эффект присоединенных масс, что требует более тщательного анализа.

Следующий рисунок (рис. 3) иллюстрирует процессы, происходящие в результате подачи кратковременного прямоугольного импульса по давлению в крайнем левом сечении трубопровода. Волна давления отражается от заглушки, расположенной в крайнем правом сечении участка трубопровода.

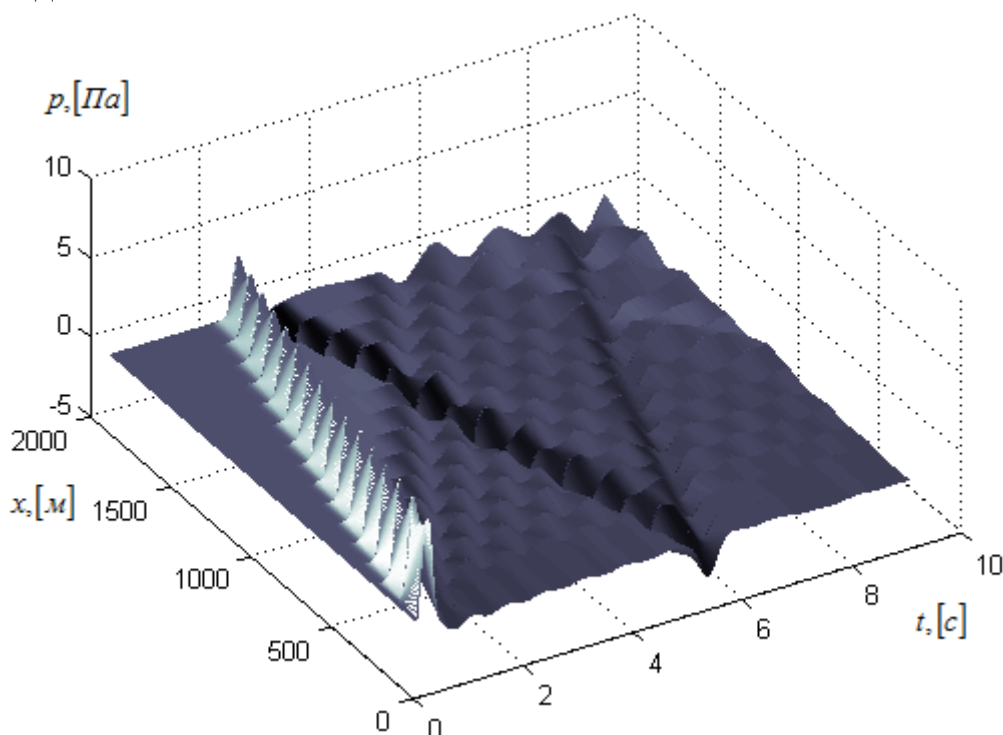


Рис. 3. Расчетные значения давления в зависимости от времени и координаты сечения трубопровода для численного эксперимента II

На рис. 4 изображен результат модельного эксперимента по включению насоса, расположенного в середине моделируемого участка трубопровода. Для учета граничных условий в сечении с координатой расположения насоса используется связь давления и скорости течения жидкости, заданная расходе-напорной характеристикой насоса (за основу брали кубическую аппроксимацию характеристики для центробежного магистрального насоса НМ3500-230) [4].

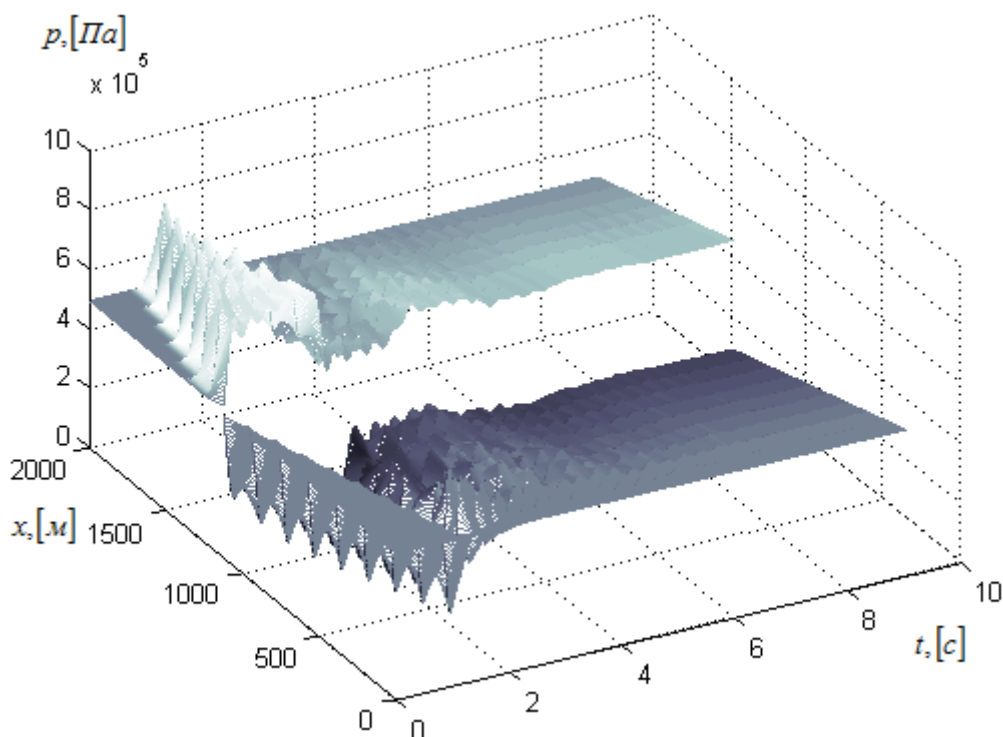


Рис. 4. Расчетные значения давления в зависимости от времени и координаты сечения трубопровода для численного эксперимента III

В результате получили зависимости давления потока жидкости от координаты и времени, которые качественно соответствуют процессам, протекающим в магистральном нефтепроводе. Количественный анализ предложенного алгоритма будет возможен в процессе настройки моделей по данным измерений технологических параметров магистрального нефтепровода.

Заключение

Настоящая статья содержит описание алгоритма построения эвристической имитационной модели неустановившихся процессов в магистральном нефтепроводе, построенного на основе физического описания конечного множества выделенных в трубопроводе сегментов. Обсуждены

вопросы учета начальных и граничных условий в модели, приведены иллюстрации, полученные при программной реализации представленного алгоритма.

Представленный подход к построению имитационных моделей участка магистрального нефтепровода позволяет проанализировать происходящие гидродинамические процессы с качественной стороны. Количественный анализ возможен в случае реализации шагов по совершенствованию измерительной аппаратуры, современных средств сбора и хранения данных измерений технологических параметров.

Список литературы

1. Лурье М.В. Математическое моделирование процессов трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа. М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2003. 336 с.
2. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя. М.: Наука, 2003. 432 с.
3. Рыжиков Ю.И. Имитационное моделирование: теория и технологии. М.: Альтекс, 2004. 384 с.
4. Типовые расчеты при проектировании и эксплуатации нефтебаз и нефтепроводов / П.И. Тугунов [и др.]. Уфа: ООО «ДизайнПолиграфСервис», 2002. 658 с.
5. Файзуллин Р.Т. О решении нелинейных алгебраических систем гидравлики // Сибирский журнал индустриальной математики. 1999. № 2. С. 176-184.
6. Файзуллин Р.Т., Мызников А.М. Уточнение коэффициентов сопротивления в сложных гидравлических сетях по результатам ограниченного числа измерений // Теплофизика и аэромеханика. 2005. № 3. С. 513-516.
7. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука. М.: Мир, 1978. 418 с.
8. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления. М.: Мир, 1975. 680 с.

Агафонов Евгений Дмитриевич, канд. техн. наук, доц., agafonov@gmx.de, Россия, Красноярск, Сибирский федеральный университет,

Ващенко Галина Вадимовна, канд. физ.-мат. наук, проф., vgvtogsm@yandex.ru, Россия, Красноярск, Сибирский федеральный университет

HEURISTIC SIMULATION MODEL OF TRUNK PIPELINE

E.D. Agafonov, G.V. Vashenko

In the paper simulation models of processes in trunk pipeline are considered. A heuristic approach for pipeline segment modeling is proposed. One discusses algorithmic solution of the approach. The model is originally discreet, and it is based on principles of hydrodynamics. Some considerations on tuning of the model, as its well as graphical representation are also provided in the paper.

Keywords: trunk pipeline, hydrodynamics, simulation model.

Agafonov Evgeniy Dmitrievich, Cand. of Tech. Sc., Docent, agafonov@gmx.de, Russia, Krasnoyarsk, Siberian Federal University,

Vashenko Galina Vadimovna, Cand. of Phys. and Math. Sc., Docent, vgvtogsm@yandex.ru, Russia, Krasnoyarsk, Siberian Federal University